

CAPÍTULO 8

METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL E GENÉTICA DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis*) PARA A CONSERVAÇÃO E USO SUSTENTÁVEL

Data de aceite: 01/10/2021

Data da submissão: 18/08/2021

João Bosco Vasconcellos Gomes

Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira
Colombo, PR

<http://lattes.cnpq.br/6857040451096506>

Marcos Silveira Wrege

Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira
Colombo, PR

<https://orcid.org/0000-0002-6368-6586>

<http://lattes.cnpq.br/8219074753068077>

Letícia Penno de Sousa

Embrapa Clima Temperado
Pelotas, RS

<http://lattes.cnpq.br/0295603184467599>

Márcia Toffani Simão Soares

Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira
Colombo, PR

<https://orcid.org/0000-0003-3820-1855>

<http://lattes.cnpq.br/8126806697900042>

Valderês Aparecida de Sousa

Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira
Colombo, PR

<https://orcid.org/0000-0003-1138-8189>

<http://lattes.cnpq.br/7394142748731060>

Elenice Fritzsos

Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira
Colombo, PR

<https://orcid.org/0000-0003-1225-7623>

<http://lattes.cnpq.br/5911347834354100>

Ananda Virginia de Aguiar

Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira
Colombo, PR

<http://lattes.cnpq.br/5613653432409380>

Itamar Antônio Bognola

Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira
Colombo, PR

<http://lattes.cnpq.br/7188332775812929>

RESUMO: *Ilex paraguariensis* (A. St. Hil.), conhecida como erva-mate no Brasil ou yerba mate nos países da América Latina de língua espanhola, é uma espécie arbórea nativa das regiões serranas frias e úmidas do Sul e do Centro Oeste do Brasil. A espécie ocorre, na maior parte da área, na Floresta Ombrófila Mista - FOM. Por meio do acordo firmado em 2015 na COP21, o Brasil assumiu o compromisso de aumentar a conservação dos recursos genéticos e promover o uso sustentável de sua biodiversidade. Para dar subsídios a esta demanda, foi desenvolvida a presente metodologia visando caracterizar o ambiente e a genética de populações de erva-mate. O método desenvolvido consistiu em: 1) definir as zonas periféricas de ocorrência de erva-mate e indicar regiões com prioridade para amostragens; 2) obter amostras para genotipagem e para determinar os compostos fenólicos nas folhas; 3) amostrar os solos; 4) analisar o clima; e 5) identificar os nichos ecológicos das populações. As coletas ocorreram em cinco pontos nas zonas periféricas da área de distribuição natural da espécie, onde suas populações têm maior diversidade genética. O

material foi genotipado, para conhecimento de suas características genéticas. Suas folhas foram analisadas quanto aos compostos fenólicos. Os resultados obtidos demonstram que a erva-mate ocorre na natureza em condições pedoclimáticas adversas, desde o extremo sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul, até o sul do Mato Grosso do Sul, em altitudes que variam desde os 211 até os 1700 metros, nos mais diversos tipos de solos, desde os mais profundos até os mais rasos, em variadas condições de fertilidade, em clima frio e úmido, com riscos variados de geada, formando grupos de populações com características comuns, em função das condições pedoclimáticas de cada região. A metodologia desenvolvida é passível de aplicação em populações de outras espécies arbóreas nativas.

PALAVRAS - CHAVE: Conservação genética, distribuição de espécie, *Ilex paraguariensis*.

METHODOLOGY FOR ENVIRONMENTAL AND GENETIC CHARACTERIZATION OF YERBA MATE (*Ilex paraguariensis*) FOR CONSERVATION AND SUSTAINABLE USE

ABSTRACT: *Ilex paraguariensis* (A. St. Hil.), known as “erva-mate” in Brazil or yerba mate in Spanish-speaking Latin American countries, is a tree species native to the cold and humid mountainous regions of the South and Midwest of Brazil. The species occurs, in most of the area, in the Ombrophilous Mixed Forest - FOM. Through the agreement signed in 2015 at COP21, Brazil assumed the commitment to increase the conservation of genetic resources and promote the sustainable use of its biodiversity. To support this demand, the present methodology was developed to characterize the environment and genetics of yerba mate populations. The method developed consisted of: 1) defining the peripheral zones of occurrence of yerba mate and indicating regions with priority for sampling; 2) obtain samples for genotyping and to determine phenolic compounds in leaves; 3) sample the soils; 4) analyze the climate; and 5) identify the ecological niches of populations. The collections took place at five points in the peripheral zones of the species natural distribution area, where their populations have greater genetic diversity. The material was genotyped for knowledge of its genetic characteristics. Its leaves were analyzed for phenolic compounds. The results obtained demonstrate that yerba mate occurs in nature in adverse pedoclimatic conditions, from the extreme south of Brazil, in the state of Rio Grande do Sul, to the south of Mato Grosso do Sul, at altitudes ranging from 211 to 1700 meters, in the most diverse types of soils, from the deepest to the shallowest, in varied fertility conditions, in a cold and humid climate, with varied risks of frost, forming groups of populations with common characteristics, depending on the pedoclimatic conditions of each region. The developed methodology can be applied to populations of other native tree species.

KEYWORDS: Genetic conservation, species distribution, *Ilex paraguariensis*.

1 | INTRODUÇÃO

Ilex paraguariensis (A. St. Hil.), conhecida popularmente como erva-mate no Brasil ou yerba mate nos países da América Latina de língua espanhola, é uma espécie arbórea nativa das regiões serranas frias e úmidas do Sul e do Centro Oeste do Brasil. A espécie ocorre na Mata Atlântica, concentrando-se na Floresta com Araucária, fitofisionomia

conhecida também como Floresta Ombrófila Mista (FOM), um dos mais importantes tipos de vegetação do bioma Mata Atlântica e de elevada vulnerabilidade às mudanças climáticas globais. A FOM ocorre nas regiões de altitude do Sul e do Sudeste do Brasil, em áreas de temperaturas muito baixas. As espécies que ocorrem neste tipo de vegetação são vulneráveis porque, com o aquecimento global, não têm onde se realocarem e estão sujeitas a maior perda de diversidade, principalmente nas áreas periféricas e de transição climática. A manutenção da cobertura arbórea é fundamental para garantir a capacidade de adaptação e de resiliência da espécie às ameaças climáticas, bem como os serviços ecossistêmicos, entre os quais estão relacionadas as seguranças hídrica e energética do Sul e do Sudeste do país e a mobilização de carbono da atmosfera. Nela ocorrem as nascentes dos principais rios da região que suprem os reservatórios de água para as cidades, o campo e as hidroelétricas.

A obtenção de resultados que gerem informações para auxiliar no aumento da capacidade de adaptação e de resiliência da espécie às ameaças climáticas e que visem garantir a manutenção de sua diversidade genética é fundamental e atende aos termos do acordo do clima de Paris, 21^a Conferência das Partes - COP21, da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, do qual o Brasil é signatário e no qual se comprometeu a aumentar a capacidade de conservação das espécies nativas e a garantir o uso sustentável dos recursos da biodiversidade dos biomas brasileiros, inclusive os do bioma Mata Atlântica.

No trabalho, foram obtidos resultados que auxiliarão os formuladores de políticas públicas e os tomadores de decisão na criação de leis e normas que colaborem para manter a capacidade de adaptação e de resiliência da erva-mate às ameaças do clima, como a indicação de áreas de menores riscos climáticos e de grupos de populações com características comuns, que podem facilitar a indicação das melhores zonas para estabelecimento da espécie e, assim, auxiliar nos processos de tomada de decisão.

Neste contexto, desenvolvemos uma metodologia para caracterizar o ambiente e a genética de populações naturais de erva-mate, visando garantir a manutenção ou aumento da capacidade de conservação e do uso sustentável dos recursos genéticos da espécie. O método consiste de cinco etapas: 1) definição das zonas periféricas de distribuição de erva-mate e seleção de regiões com prioridade para amostragem; 2) amostragem no campo para genotipagem e indicação de compostos fenólicos nas folhas; 3) amostragem de solo; 4) caracterização do clima, e 5) identificação dos nichos ecológicos dos grupos populacionais. Atualmente, o presente protocolo está sendo utilizado para estudo de populações situadas na região Sul do Brasil, área de predominância da espécie.

Embora tenha sido desenvolvido para erva-mate, o método pode ser aplicado, com adaptações, para uso em outras espécies arbóreas nativas. O método pode servir também para que pesquisadores na área de conservação de recursos genéticos elaborem planos de amostragem de material genético no campo com uma abordagem multidisciplinar.

2 | METODOLOGIA

No desenvolvimento do método, foram programadas atividades multidisciplinares envolvendo diferentes áreas do conhecimento, com o objetivo de obter informações para garantir o aumento da capacidade de conservação e do uso sustentável dos recursos genéticos da erva-mate. Para atingir este objetivo, diferentes grupos populacionais da espécie foram caracterizados geneticamente e relacionados ao sítio de ocorrência de cada um quanto aos atributos pedoclimáticos, analisando o desenvolvimento dos indivíduos no ambiente. Para este fim, foram feitos dois tipos de levantamento, o primeiro contando com dados primários obtidos em campo e o segundo, com dados secundários da literatura e de herbários de acesso público, como os do Centro de Informações Ambientais – CRIA (CRIA, 1999), por exemplo.

No trabalho de campo, foram feitas expedições a algumas regiões estratégicas dentro da região de distribuição natural da espécie, em áreas periféricas e de transição climática, onde alguns indivíduos foram aleatoriamente selecionados, amostrados e georreferenciados, respeitando-se um raio mínimo de 100m entre as árvores, para evitar a obtenção de amostras aparentadas. Paralelamente, os parâmetros pedoclimáticos dos locais de coleta foram levantados.

Entre os atributos pedológicos, obteve-se a classificação do solo e a profundidade, drenagem, pedregosidade, textura e fertilidade do solo. Para cada indivíduo, mediu-se a altura e a circunferência na altura do peito (CAP). Estas informações serviram para desenvolver modelos de crescimento dos indivíduos nos seus habitats, permitindo caracterizá-los geneticamente em relação ao potencial de produção.

Em relação aos pontos de presença da espécie, dados secundários foram compilados e organizados, avaliando sua qualidade e eliminando aqueles com suspeita de erro, por exemplo os discrepantes, com o objetivo de completar os levantamentos de campo e dar uma melhor dimensão espacial às análises. Este processo de validação de dados é necessário, pois os bancos são alimentados por diversas fontes, provenientes de diversos herbários que utilizam metodologias distintas, sendo necessária uma uniformização.

Com o mesmo objetivo, foram utilizados também dados secundários de clima, de solos e de parâmetros genéticos das populações naturais, como testes de procedências e de progênies obtidos na literatura.

2.1 Definição das zonas periféricas de distribuição da erva-mate visando o planejamento estratégico para amostragem

Ao todo, para o desenvolvimento do trabalho, foram feitas cinco expedições a campo e, em cada uma delas, houve uma etapa de planejamento da viagem, por meio de contatos previamente estabelecidos, verificando a possibilidade de acompanhamento de um técnico local, com bom conhecimento da região e das áreas preservadas, com o

objetivo de amostrar as áreas com melhor conservação e evitar a amostragem em áreas não conservadas, com árvores provenientes de outras regiões.

As coletas de campo foram feitas priorizando as zonas periféricas de distribuição da espécie, onde a diversidade genética é maior e o risco de extinção de populações mais fragilizadas e menos adaptadas é maior. Devido às diferenças das condições do clima nas zonas periféricas em relação às zonas predominantes da espécie, existem populações de erva-mate que são únicas (endêmicas) e ocorrem apenas nestas zonas e, por estarem no limite máximo das condições favoráveis para se desenvolver, o risco de extinção é iminente e pode ser irreversível.

Assim, alguns critérios foram definidos pela equipe para a seleção das regiões visando a amostragem, entre os quais priorizar áreas mais preservadas, dentro de Florestas Nacionais (Flonas) ou no entorno, seguindo orientação de seus diretores, ou Parques Nacionais. Nos locais em que não existiam Flonas ou Parques, as áreas melhor preservadas foram indicadas por professores e pesquisadores das universidades locais e institutos de pesquisa, envolvendo também a participação das comunidades locais, geralmente agricultores familiares.

Foram feitas expedições aos seguintes locais: estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais - Parque Nacional do Itatiaia; estado do Rio Grande do Sul - municípios da Serra do Sudeste (Escudo Sul-Riograndense) - Pelotas, Canguçu e Santana da Boa Vista; Flona de São Francisco de Paula; município de Machadinho e região; Flona de Passo Fundo; estado do Paraná - município de Quatro Barras e região; Mato Grosso do Sul – município de Laguna Caarapá. A Figura 1 traz uma representação sintética da metodologia utilizada.

Os levantamentos feitos nas cinco expedições serviram para aumentar as amostragens que estão sendo feitas ao longo das últimas décadas, formando um banco de dados da espécie, e que requer continuidade, ao longo das próximas décadas, com novas expedições, por exemplo, às regiões sudoeste, oeste e noroeste do estado do Paraná, conhecidas por possuírem características de solo e de clima inigualáveis e que são capazes de proporcionar desenvolvimento diferenciado das espécies, entre as quais a erva-mate, assim como os estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

2.2 Genotipagem

Nas regiões selecionadas para as expedições, foram efetuados os trabalhos de campo, selecionando aleatoriamente indivíduos para a identificação, mensuração e coleta de material biológico. Em cada local amostrado, foram analisadas em média 30 árvores, respeitando o raio mínimo de 100m entre indivíduos (Sousa et al., 2005), conforme mencionado anteriormente. Foram registradas as coordenadas geográficas dos indivíduos; foram feitas coletas de amostras de folhas para genotipagem (em laboratório), visando conhecer as características genéticas das populações (Figura 2).

2.2.1 Amostragem para genotipagem

Genotipagem é a técnica que visa conhecer a constituição genética de uma célula, de um organismo ou de um indivíduo. Várias técnicas podem ser usadas para este fim. Uma delas é a de microssatélites, que são unidades de repetição de pares de bases de DNA (Adenina-Timina: AT e Guanina-Citosina: GC), as quais são utilizadas como marcadores genéticos em estudos de parentesco. Neste trabalho, foi utilizada a técnica de microssatélites para o conhecimento da constituição genética de populações de erva-mate (Sousa et al., 2005).

O método tradicional de amostragem para genotipagem de espécies arbóreas, utilizado neste trabalho, baseia-se na coleta de folhas e ramos.

2.3 Amostragem de solos

Amostras de solos (Figura 3) foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm; 20-50 cm e 50-100 cm, em local próximo à coleta de cada indivíduo amostrado, sendo feita sua classificação no campo. Em cada expedição, foram coletadas em torno de 90 amostras de solos para a determinação dos atributos pedológicos, entre os quais profundidade, drenagem, pedregosidade, textura, fertilidade, capacidade de armazenamento de água (CAD), quantidade de matéria orgânica e pH. As amostras foram levadas ao laboratório para as análises físicoquímicas.

Paralelamente, foram trabalhados dados secundários, com levantamento dos mapas de solos dos Estados com ocorrência de erva-mate, compondo uma legenda completa, com todos os atributos importantes para erva-mate, de acordo com os critérios estipulados em Garrastazu et al. (2009).

Em ambiente SIG, a partir do mapa com as classes de solos por Estado, as tabelas de atributos correspondente aos mapas foram exportadas do ArcGIS para o formato texto (dbf), as quais foram trabalhadas em planilha eletrônica do Excel, inserindo os dados dos atributos de solos que não haviam no mapa original (profundidade, drenagem, pedregosidade etc.). A tabela dos atributos foi elaborada e associada às legendas dos solos a partir de informações das cartilhas que acompanhavam os mapas. Na etapa seguinte, a tabela foi importada novamente para o ArcGIS, obtendo-se o mapa de solos com a legenda atualizada contendo os atributos, cada um compondo uma camada, pronta para ser utilizada no mapeamento da distribuição de ocorrência de erva-mate ou para uso na caracterização dos atributos de solos de cada ponto de ocorrência da espécie.

2.4 Caracterização do clima

A importância de analisar as condições climáticas para o desenvolvimento da erva-mate ocorre em função de poder definir um calendário para plantio, nas melhores condições e nas melhores regiões, compreendida pelas regiões em que as variáveis climáticas melhor atendem à necessidade da espécie (Wrege et al., 2016), além de poder relacionar com os

dados de crescimento da espécie.

A caracterização do clima nas regiões em que a erva-mate ocorre foi estabelecida por meio de sistemas de informações geográficas - SIG. Neste ambiente, as camadas de clima elaboradas por Wrege et al. (2011) (Wrege et al., 2016; 2018a) (escala 1:250.000) foram relacionadas aos pontos georreferenciados de ocorrência de indivíduos da espécie, usando a função do ArcGIS (ESRI, 2011) “Extract values to point”, onde, para cada ponto, foi obtido um valor de cada variável climática para cada mês, estação do ano e para o ano na região Sul do país.

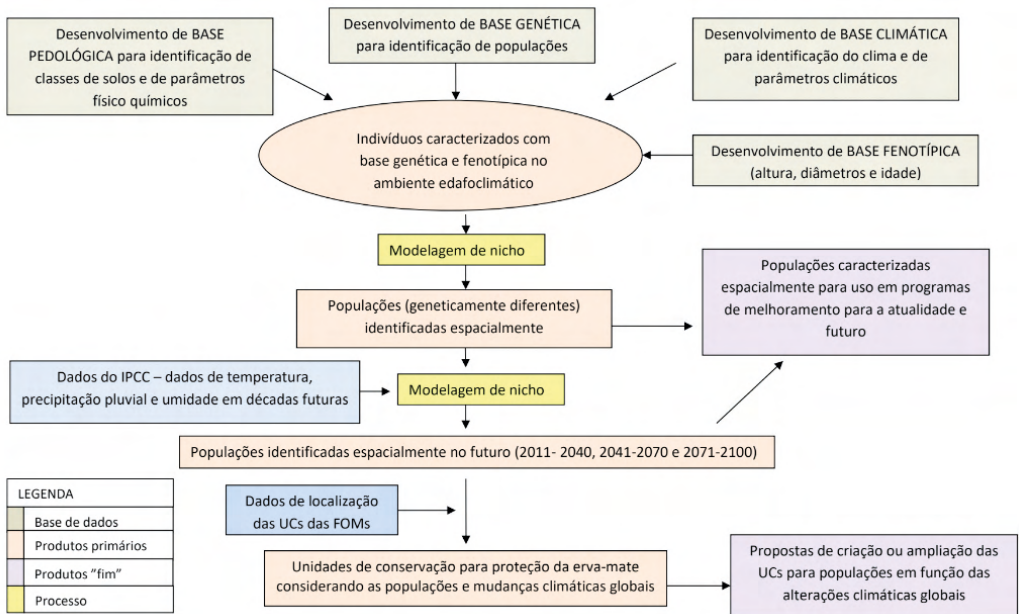


Figura 1. Representação esquemática dos procedimentos metodológicos desenvolvidos para erva-mate (elaborado por Marcos Silveira Wrege).

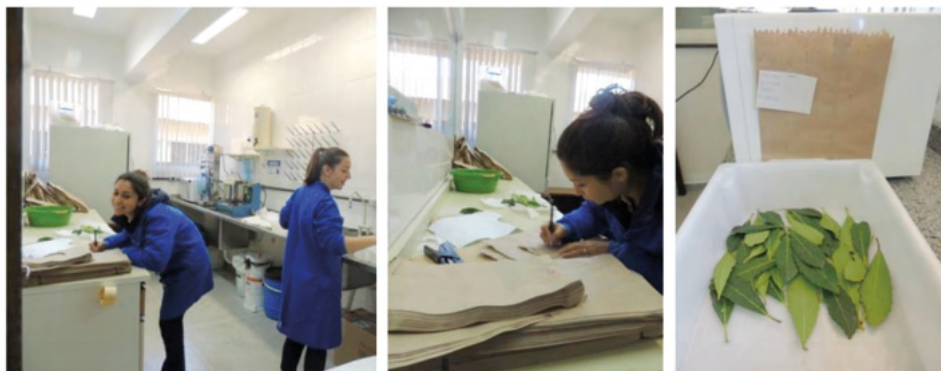


Figura 2. Extração das folhas da erva-mate para genotipagem das populações. Fotos: Márcia Toffani Simão Soares.



Figura 3. Extração de amostras de solos e classificação em campo

(Foto: Márcia Toffani Simão Soares).

As variáveis climáticas relacionadas, referentes ao período 1976-2005, foram a temperatura mínima, mínima absoluta, média, máxima e máxima absoluta; pluviosidade; evapotranspiração potencial e a diferença (P-ETP) entre a precipitação pluvial (P) e a evapotranspiração potencial (ETP). A fonte dos dados primários utilizados que deram origem às camadas das variáveis climáticas referem-se ao IDR (Iapar/Emater), Epagri, Fepagro, 8º Disme/Inmet, ANA, Universidades Federais e Embrapa, obtidas de Wrege et al. (2011).

As camadas foram geradas por dois métodos diferentes, dependendo de suas características: 1) “regressão linear múltipla” (Pinto et al., 1972), no caso das temperaturas e evapotranspiração potencial; ou 2) “krigagem indicatriz”, no caso da precipitação pluvial e do balanço hídrico. No primeiro caso, utilizou-se o modelo numérico do terreno (MNT) (USGS, 1999), que representa a altitude, além de modelos gerados para a latitude e a longitude (escala 1:250.000), seguindo-se metodologia conforme Wrege et al. (2011).

As relações existentes entre a temperatura e a altitude (MNT, em metros), a latitude e a longitude (em graus decimais) foram estabelecidas pela seguinte expressão matemática:

$$\text{temperatura} = a + b \times (\text{altitude}) + c \times (\text{latitude}) + d \times \text{longitude}$$

Onde:

a: constante; b: coeficiente da altitude; c: coeficiente da latitude; d: coeficiente da

longitude.

Para a obtenção das camadas das temperaturas, utilizou-se a função calculadora de camadas (“raster calculator”) do programa ArcGIS (ESRI, 2011), onde foi aplicada a equação apresentada anteriormente. Os coeficientes das equações de regressão foram publicados por Wrege et al. (2011; 2016).

A técnica da “krigagem indicatriz” foi usada para mapear a precipitação pluvial e o balanço hídrico. Usou-se a função “Geostatistical Analyst” do ArcGIS para elaborar as camadas (escala 1:250.000).

Do mesmo modo que foi feito para os solos, as variáveis de clima podem ser relacionadas à composição fitoquímica das folhas de erva-mate e, com os dados obtidos no item referente aos solos, relacionar a composição das folhas com as variáveis pedoclimáticas (solo + clima) e determinar quais são as melhores condições ambientais para o desenvolvimento da erva-mate e a produção dos compostos.

2.5 Definição de zonas homogêneas

Técnicas estatísticas foram usadas para auxiliar na definição do clima na região de distribuição da espécie, contribuindo para estabelecer os limites dos parâmetros climáticos dentro dos quais a espécie encontra condições para o seu desenvolvimento (Fritzsons et al., 2017; 2018). O trabalho foi feito em nível de estado, para a região sul do país, utilizando dados climáticos obtidos de Wrege et al. (2011). Os dados foram separados em dois grupos, baseados no “Zoneamento Ecológico para Plantios Florestais do estado do Paraná e do estado de Santa Catarina” (Carpanezi et al., 1986, 1988): 1) zonas onde a erva-mate ocorre naturalmente e 2) zonas onde não ocorre.

Foram utilizados os seguintes dados: temperatura média anual, temperatura média no verão, no inverno; média da precipitação pluvial acumulada no ano, no inverno, no verão; diferença entre precipitação pluvial e evapotranspiração potencial acumulada no ano, no verão e no inverno (mm); altitude (m) e insolação média anual (horas). Os dados utilizados, referentes ao período entre 1976 e 2005, foram publicados por Wrege et al. (2011), provenientes de estações meteorológicas do Sul do Brasil, entre as quais as do IDR (Iapar/Emater), Ciram/Epagri, Deapi, ANA, 8º Disme/Inmet, universidades federais e Embrapa.

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística descritiva, para identificar os valores médios, máximos e mínimos. Foram aplicados dois testes estatísticos, o de Student e o de Mann-Whitney, para verificar quais variáveis climáticas foram significativamente diferentes, utilizando respectivamente os valores médios e as medianas referentes a cada grupo.

Por sua vez, nas áreas onde a erva-mate está presente, os pontos de presença da espécie foram separados em grupos pela análise de cluster. Para este fim, utilizou-se dados de clima das estações meteorológicas mais próximas possível de cada ponto.

Utilizou-se uma outra análise estatística, a ANOVA (one way) para diferenciar subgrupos resultantes da análise de cluster. Os gráficos de distribuição de frequências auxiliaram na visualização das diferenças dos grupos e subgrupos.

2.6 Identificação dos nichos ecológicos de grupos populacionais

A modelagem de nicho ou modelagem de distribuição (potencial) de espécies trabalha com dados de distribuição geográfica de espécies, entre as quais latitude e longitude, e com camadas ambientais, como variáveis de clima, atributos de solos e, ou elementos da paisagem (como relevo, topografia etc.), compondo um sistema matemático de previsão de distribuição geográfica de espécies.

Predição mais precisa requer um conjunto de pontos georreferenciados de qualidade, contando com a certeza da presença da espécie. As camadas ambientais precisam corresponder às regiões onde a espécie ocorre. Quanto mais detalhada for a escala das camadas, melhor poderá ser a representação dos resultados contendo as predições de ocorrência da espécie. Todas as camadas devem ter a mesma dimensão, escala e projeção.

A predição de ocorrência de erva-mate foi feita utilizando dois modelos de algoritmos: *Bioclim* e *Niche Mosaic*. Esses modelos foram selecionados por representarem melhor as condições naturais de ocorrência da espécie. Para cada espécie, há um modelo correspondente que gera o melhor resultado, com menor erro de previsão de ocorrência.

As zonas periféricas da região de distribuição de erva-mate foram delimitadas, baseando-se nos elementos de paisagem (relevo e altitude) e nas variáveis de clima. O efeito das mudanças climáticas (WMO, 2013) foi testado sobre as zonas de ocorrência da espécie, utilizando dados climáticos do Sul do país (Wrege et al., 2011) e das demais regiões de ocorrência de erva-mate. Para os cenários futuros, foram utilizados modelos climáticos do Eta RCM (modelo climático regional), o HadGEM2-ES, o qual engloba toda a América do Sul, América Central e Caribe, cujos cenários futuros foram preditos de acordo com o proposto no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (AR5/IPCC) (IPCC, 2013).

As áreas correspondentes à zona de distribuição da erva-mate foram calculadas, usando dois modelos matemáticos (algoritmos). As áreas dos cenários futuros também foram calculadas, em metros quadrados, além da percentagem de sua redução.

Os programas usados foram o Open Modeller (Muñoz et al., 2011) e o ArcGIS 10.1 (ESRI, 2011). O primeiro é um programa de modelagem de nicho ecológico, de acesso público. O segundo é um software proprietário de sistema de informações geográficas – SIG, que trabalha com operações e edições de camadas e indica escala, posição do Norte, sistema de projeção, cálculo de áreas e permite elaborar legenda com a classificação de zonas. Mapas de referência para grupos populacionais de erva-mate contendo sua localização foram elaborados.

3 | RESULTADOS OBTIDOS

A caracterização das zonas de distribuição de erva-mate quanto às variáveis de clima, aos atributos de solos e ao material genético é fundamental para o desenvolvimento da cultura no país, demandando, para este fim, uma metodologia multidisciplinar. Assim, pode-se conhecer o desenvolvimento de um conjunto de indivíduos com características comuns - grupos de populações - por região, em função das condições ambientais (solo e clima). Com este intuito, foram feitas as expedições às cinco regiões do país citadas anteriormente, priorizando as zonas periféricas da distribuição da espécie, a fim de se conhecer as condições pedoclimáticas que limitam sua ocorrência e obter amostras de populações com maior diversidade genética. Estas zonas têm maior riqueza de material genético e contêm populações únicas, endêmicas, pelo fato de ocorrerem condições ambientais diferentes, existentes apenas nas zonas de transição. As populações, nestas zonas, estão sujeitas a um risco maior de “desaparecimento” (extinção), por estarem situadas na zona periférica de distribuição da espécie, onde a faixa de clima representa o ponto de virada entre a região favorável e a desfavorável. Portanto, são zonas que devem ser priorizadas para a amostragem de indivíduos e caracterização do ambiente, que podem deixar de existir em decorrência das mudanças climáticas globais e das ações antrópicas, as quais têm sido responsáveis pela maior fragmentação da cobertura florestal. A necessidade é urgente de trabalhos multidisciplinares voltados às espécies nativas quanto ao ambiente e à genética, com alto nível de detalhamento, unindo as diferentes áreas do conhecimento na convergência de esforços para constituir bancos de dados, os quais sirvam para auxiliar nos processos de tomada de decisão visando a conservação destas espécies.

Neste sentido, o Brasil se comprometeu em aumentar a capacidade de conservação da diversidade genética e fazer o uso sustentável de suas espécies nativas no Acordo do Clima de Paris, em 2015, na 21ª Conferência das Partes - COP21.

Assim, esta metodologia pode ser empregada inteiramente ou em partes, com adaptações, para a maioria das espécies arbóreas brasileiras. O trabalho contém informações estratégicas tanto para os profissionais que trabalham com a conservação de espécies nativas, como para os que desenvolvem programas de melhoramento genético.

Os resultados obtidos relacionam-se com as seguintes áreas do conhecimento, as quais podem se aperfeiçoar a partir do conhecimento adquirido:

“Melhoramento genético” - os programas de melhoramento genético de erva-mate podem ser aperfeiçoados por meio do mapeamento de grupos populacionais e da caracterização de seus sítios, estratégico para o uso do germoplasma da espécie. O conhecimento das condições ambientais e genéticas das populações permitem identificar, no campo, os melhores grupos de populações para uso nos programas de melhoramento genético da espécie. Indivíduos com diferentes características fenotípicas podem ser

caracterizados e selecionados para uso em programas de melhoramento ou diretamente em plantios comerciais mais produtivos.

“Conservação dos recursos genéticos” - a identificação de populações com maior divergência genética poderá contribuir efetivamente para a conservação e o uso sustentável dos recursos genéticos de erva-mate, reduzir a perda de diversidade genética e, assim, reduzir o risco de extinção de algumas populações (ou procedências) menos adaptadas, principalmente aquelas situadas nas zonas periféricas de distribuição da espécie, tais como aquelas do extremo sul do Rio Grande do Sul, onde o ambiente é diferente dos demais, e outras populações encontradas em fragmentos mais ao norte da região de ocorrência, que apresentam características diferentes. As populações nas zonas periféricas são as que têm maior diversidade genética. A garantia de manutenção desta diversidade é importante também para assegurar recursos renováveis para a geração de novos produtos que poderão futuramente ser desenvolvidos a partir da geração de compostos fenólicos presentes nas folhas.

Para a conservação das populações naturais de erva-mate, os reflorestamentos ou os plantios em bancos de germoplasma devem ser feitos nos ambientes os mais semelhantes possível aos de onde foram feitas as coletas de sementes, para conservar os genes adaptados ao ambiente específico onde a população se desenvolveu, evitando com isso a exogamia, que é o cruzamento de indivíduos provenientes de populações de outros locais com as populações do local.

O método desenvolvido serve de base para que profissionais na área de conservação de recursos genéticos elaborem planos de amostragem de material genético no campo, com uma abordagem multidisciplinar.

“Políticas públicas” – Com os dados levantados nas expedições a campo, foi possível mapear a zona de distribuição de erva-mate e elaborar cenários futuros, analisando o que poderá ocorrer no futuro quanto à distribuição da espécie em relação às mudanças climáticas globais. Assim, os formuladores de políticas públicas e os tomadores de decisão terão informações que darão suporte à tomada de decisão para a criação de leis e normas relativas a criação de novas áreas a serem protegidas ou garantir as existentes, visando a conservação da espécie.

“Zoneamento de riscos climáticos” - a caracterização dos genes e do ambiente dos grupos de populações de erva-mate colabora para a definição de critérios e classes de aptidão ou de riscos de atributos pedoclimáticos, que identifiquem as regiões com os menores riscos climáticos para plantio comercial ou não comercial da erva-mate, voltados à constituição de reserva legal, banco de germoplasma etc.

“Modelos de distribuição de espécie” - com o desenvolvimento dos modelos de distribuição de erva-mate em nível de grupos de populações, pode-se identificar as regiões com maior potencial de uso da espécie em reflorestamento, visando a produção comercial, ou a indicação de regiões para composição em plantios destinados à reserva legal,

em atendimento ao código florestal. As áreas com maior risco de perda de populações e redução da diversidade genética da espécie, em função das ações antrópicas e das mudanças climáticas globais, também foram identificadas e, assim, podem ser sugeridas ações de mitigação dos impactos causados pelas ameaças climáticas, incluindo a criação de novas Unidades de Conservação (UCs), expansão ou manutenção das existentes, de acordo com o Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012).

4 | CONCLUSÕES

A metodologia multidisciplinar desenvolvida é passível de uso para outras espécies arbóreas nativas e pode contribuir na formação de bancos de dados sobre estas espécies, os quais podem aumentar o conhecimento e gerar subsídios para o aumento de produtividade.

O uso da metodologia desenvolvida, ao indicar grupos de populações ou de regiões estratégicas com características comuns, pode auxiliar no desenvolvimento de programas de conservação ou melhoramento genético de erva-mate mais eficientes, com o mapeamento das populações e descrição de suas características genéticas, solo e clima.

Com o objetivo de garantir a capacidade de adaptação e resiliência da erva-mate às ameaças climáticas e às ações antrópicas, o uso da metodologia pode dar suporte à seleção de áreas para criação de novas unidades de conservação - UCs, ou de manutenção ou expansão das existentes, para a conservação dos recursos genéticos da espécie.

Com os resultados obtidos, existem condições para a elaboração de um zoneamento de riscos climáticos para a erva-mate, que indique áreas de menor risco para o estabelecimento dos plantios, com a possibilidade de que os agentes financeiros venham a se interessar por financiá-los, incentivando a conservação pelo uso.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio dado pelos coordenadores das Florestas e Parques Nacionais visitados, onde obteve-se apoio para o desenvolvimento das ações previstas no projeto Araucamate, especialmente ao Sr. Adão da Costa Gülich, diretor da Flona de Passo Fundo (RS), pelo auxílio aos trabalhos desenvolvidos na Flona que coordena e pela viabilização de novos contatos com outras Flonas; Sra. Edenice Brandão de Ávila, diretora da Flona de São Francisco de Paula (RS); Sr. Léo Nascimento, diretor do Parque Nacional do Itatiaia (RJ); aos funcionários da Embrapa Florestas, Sr. Jacir Faber e Sr. Moacir Taverna (in memoriam), pelos auxílios nos trabalhos de campo; à equipe do Laboratório de Genética, da Xiloteca e do Laboratório de Solos e Ciclos Biogeoquímicos da Embrapa Florestas e à Embrapa, pelo financiamento do Projeto Araucamate e apoio logístico.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o novo código florestal brasileiro.

Capanezzi, A. A.; Ferreira, C. A.; Rotta, E. et al. Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado do Paraná, Curitiba, EMBRAPA-CNPQ, 86p., 1986.

Capanezzi, A. A.; Pereira, J. C. D.; Carvalho, P. E. R. et al. Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado de Santa Catarina, Curitiba, EMBRAPA-CNPQ, 100p., 1988.

CRIA-BDT, IC/Unicamp, 1999. SinBiota - **Sistema de Informação Ambiental do Programa Biota/FAPESP**. Disponível em: <<http://www.biotasp.org.br/sia/>>. Acesso em: 25 set 2015. Centro de Referência em Informação Ambiental - BDT e Instituto de Computação - Unicamp.

ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. Pinto et al., 1972

Fritzons, E. et al. Distribuição da erva-mate no Estado do Paraná (Brasil): fatores climáticos limitantes. **Raega: O Espaço Geográfico em Análise**, v. 44, p. 258-271, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v44i0.50259.b>

Fritzons, E.; Mantovani, L.E.; Wrege, M.S. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no estado de Santa Catarina, Brasil (Relationship between altitude and temperature: a contribution to climatic zoning for the State of Santa Catarina, Brazil). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 80-92, 2016.

Fritzons, E.; Wrege, M.; Mantovani, L. E. Fatores climáticos limitantes para a distribuição da erva-mate no estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, v.45, p.663/4 - 672, 2017

Fritzons, E.; Wrege, M.S.; Mantovani, L.E. Altitude e temperatura: estudo do gradiente térmico no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, p. 108-119, 2015.

Garrastazu, M. C.; Flores, C. A.; Wrege, M. S.; Alba, J. M. F. **Zoneamento Edafoclimático para o Eucalipto na Região do Corede Sul - RS**. In: Carlos Alberto Flores; José Maria Filippini Alba; Marcos Silveira Wrege. (Org.). Zoneamento Agroclimático do Eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e Edafoclimático na Região do Corede Sul - RS. 1ed.Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009, v. 1, p. 69-78.

IPCC 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change 2013. Climate Change: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013,1535 p. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

Muñoz, M.E.S., Giovanni, R., Siqueira, M.F., Sutton, T., Brewer, P., Pereira, R.S., Canhos, D.A.L.; Canhos, V.P. (2009). 'OpenModeller:a generic approach to species' potential distribution modelling'. **Geoinformatica**. <http://dx.doi.org/10.1007/s10707-009-0090-7>.

Sousa, V.A. de; Sebbenn, A.M.; Hattemer, H.; Ziehe, M. Correlated mating in populations of a dioecious Brazilian conifer, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Forest Genet**, v. 12, p. 107-119, 2005.

U.S. Geological Survey - Survey National Mapping Division. **Global 30 arc second elevation data**. 1999. Disponível em: <<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/gtopo30.html>>. Acesso em: 10 jul. 1999.

WMO. World Meteorological Organization. **A decade of Climate Extremes**, Summary Report, 8 p. 2013.

Wrege, M. S.; Fritzsons, E.; Soares, M. T. S.; Pantano, A.P.; Steinmetz, S.; Caramori, P. H.; Radin, B.; Pandolfo, C. Risco de ocorrência de geada na região Centro-Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 524-553, 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/57306>>. Acesso em: 07 ago. 2019.

Wrege, M. S.; Sousa, V.A.; Fritzsons, E.; Soares, M.T.S.; Aguiar, A.V. Predicting Current and Future geographical distribution of Araucaria niche modeling. **Environmental and Ecology Research**, v. 4, p. 269-279, 2016.

Wrege, M.S.; Steinmetz, S.; Reisser Jr, C.; Almeida, I.R. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 336 p.